

# ETUDE DE LA SOLIDIFICATION RAPIDE D'UNE LAMELLE METALLIQUE EN CONTACT IMPARFAIT AVEC UN SUBSTRAT CERAMIQUE

Salwa. BEN NAOUA<sup>1,2</sup>, Habib SAMMOUDA<sup>2</sup>, Mohamed. EL GANAOU<sup>1</sup>,

Pierre FAUCHAIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPCTS UMR 6638 CNRS, Faculté des Sciences et Techniques, 87060 Limoges, France.

<sup>2</sup> LETTM, Faculté des Sciences de Monastir, Monastir, Tunisie

[salwa\\_bennaoua@yahoo.fr](mailto:salwa_bennaoua@yahoo.fr)

**Résumé :** Ce travail s'intéresse au problème de solidification de matériaux bicouche en régime transitoire, dont les propriétés thermophysiques dépendent de la température. Le modèle numérique utilisé est basé sur une approche enthalpique pour résoudre le problème de changement de phase dans chacun des matériaux en présence. Les résultats sont présentés pour plusieurs paramètres tel que l'épaisseur de la lamelle, la résistance thermique de contact, la nature des matériaux et leurs températures à l'impact.

## Mots clés :

Solidification rapide, résistance thermique de contact, formulation enthalpique.

## 1. INTRODUCTION

Les matériaux multicouches sont de plus en plus utilisés dans l'industrie, leur génération se fait généralement par projection plasma où les dépôts sont réalisés par un empilement de lamelles résultant de l'étalement et de la solidification de gouttes individuelles à l'état fondu ou semi-fondu [1]. Les propriétés du dépôt ainsi obtenu dépendent de la qualité du contact de ces lamelles avec le substrat ou avec une lamelle précédente [1, 2]. Les lamelles ainsi formées ont des épaisseurs tellement faibles que leur vitesse de refroidissement est très rapide de façon que chaque particule impacte sur une autre particule déposée déjà solidifiée [3]. La qualité du dépôt dépend en grande partie de sa microstructure, elle-même régie par la façon dont les particules constituant ce dépôt, s'étalent puis se refroidissent sur le substrat [2, 3]. Le contact lamelle-substrat est régi par la Résistance Thermique de Contact (RTC). Dans cette étude, on s'intéresse au refroidissement et à la solidification d'une lamelle (en Ni ou Cu) déposée sur un substrat en acier inoxydable (SS).

## 2. DESCRIPTION DU MODELE ET MISE EN EQUATION

Le problème de refroidissement est régi par l'équation de conduction de Fourier dans chaque phase des deux matériaux en présence (équation 1) couplée à la condition de Stefan à l'interface de changement de phase (Equation 2) :

$$\rho_{m,h} C_{p,m,h} \left( \frac{\partial T_{m,h}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{m,h} \frac{\partial T_{m,h}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

L'indice  $m$  indique le matériau en présence ( $m = A$  ou  $B$ ) et  $h$  indique la phase liquide ou solide ( $h = l$  ou  $s$ ).

Conservation de l'énergie à l'interface : La condition de Stefan traduite par le saut de flux thermique dégagé par chaleur latente à l'interface de changement de phase  $I(t)$ :

$$k_{m,S} \frac{\partial T_{m,S}}{\partial n} \Big|_{I(t)} - k_{m,L} \frac{\partial T_{m,L}}{\partial n} \Big|_{I(t)} = \rho_{m,L} L_f V_n \quad (2)$$

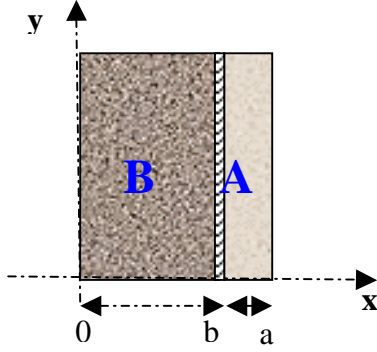


Figure 1 : Configuration physique

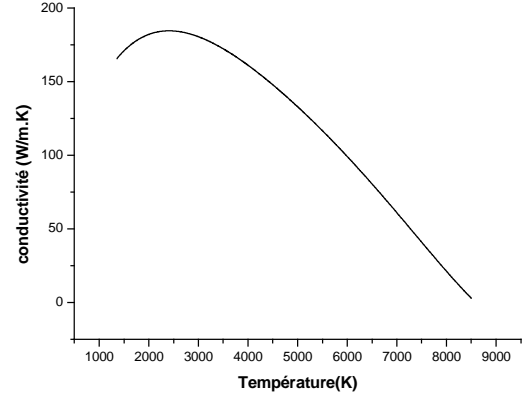


Figure 2 : Variation de la conductivité du Cu en fonction de la température.

Le contact entre les deux matériaux est considéré imparfait, il est quantifié par la présence d'une résistance thermique de contact RTC

$$+ k_{m,h}(T) \frac{\partial T_{m,h}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{1}{RTC} (T_{1,h} - T_{2,h}) \quad (3)$$

Les parois du bicouche sont supposées adiabatiques, d'où les conditions aux limites peuvent être écrites sous cette forme :

$$-k_{1,h}(T) \frac{\partial T_{1,h}}{\partial y} \Big|_{y=d} = 0, \quad -k_{2,h}(T) \frac{\partial T_{2,h}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad -k_{m,h}(T) \frac{\partial T_{m,h}}{\partial x} \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (4)$$

Les deux matériaux sont initialement à des températures uniformes:

$$\begin{aligned} T_1 [x > b, t = 0] &= T_A \\ T_2 [x < b, t = 0] &= T_B \end{aligned} \quad (5)$$

Pour résoudre numériquement les problèmes de transferts thermiques en tenant compte du changement de phase, la formulation enthalpique à maillage fixe a été utilisée [4]. La relation température/enthalpie pour un élément qui est dans un état complètement solide ou liquide est donné par:

$$h_s = \int_{T_{ms}}^T C p_s(T) dT \quad \text{pour } T < T_{ms} \quad \text{et} \quad h_L = \int_{T_{ml}}^T C p_L(T) dT + L_f \quad \text{pour } T > T_{ml} \quad (6)$$

Pour le cas d'un élément contenant l'interface de changement de phase, l'enthalpie est défini par:

$$h = f_L h_L + (1 - f_L) h_s \quad (7)$$

où  $f_L$  est la fraction liquide, définie par:

$$\begin{aligned} \text{pour } T > T_{ml} &: f_L = 1 \\ \text{pour } T < T_{ms} &: f_L = 0 \\ \text{pour } T_{ms} < T < T_{ml} &: f_L = (T - T_{ms}) / (T_{ml} - T_{ms}) \end{aligned} \quad (8)$$

où  $(T_m - T_{ms}) = (T_{ml} - T_m)$  est une quantité faible, de l'ordre de 5% de  $T_m$ , elle est utilisée pour définir la transition solide/liquide.

Les équations gouvernantes le problème peuvent être adimensionnées en utilisant comme longueur de référence l'épaisseur totale du bicouche ( $L=a+b$ ), comme temps caractéristique  $L^2/\alpha_{l,L}$  (où  $\alpha_{l,L}$  est la diffusivité thermique de la phase liquide de la couche A), et comme température de référence  $(T_m - T_B)$ . Les grandeurs adimensionnelles  $X$  et  $Y$ , temps  $\tau$  et la température  $\theta$  sont définies par:

$$(X, Y) = \left( \frac{x}{L}, \frac{y}{L} \right), \tau = \frac{t \alpha_{l,L}}{L^2} \text{ et } \theta = \frac{T - T_B}{T_m - T_B} \quad (9)$$

L'équation (1) s'écrit en adimensionnelle:

$$\left( \frac{\partial \theta_{m,h}}{\partial \tau} \right) = \nabla \cdot (\chi(T) \cdot \nabla \theta_{m,h}) \quad (10)$$

Pour le matériau A, dans la zone liquide (l,L):  $\chi=l$ , et dans la zone solide (l,S):  $\chi=\alpha_{l,S}(T)/\alpha_{l,L}(T)$ ; pour le substrat, dans la zone liquide (2,L):  $\chi=\alpha_{2,L}(T)/\alpha_{l,L}(T)$  et dans la zone solide (2,S):  $\chi=\alpha_{2,S}(T)/\alpha_{l,L}(T)$ . Une approximation numérique de type volumes finis [5] est considérée pour résoudre numériquement le problème. Un maillage ( $120 \times 120$ ) avec raffinement près de l'interface et un pas de temps de l'ordre de  $10^{-4}$  ont été considérés suffisants suite à une étude de l'influence des paramètres de discrétisation pour que les résultats en soient indépendants.

### 3. RESULTATS

On présente dans cette étude le cas d'un bicouche formé d'une lamelle de nickel (Ni) ou de cuivre (Cu), porté à une température  $T_A=2000$  K, et qui seront déposées à l'instant  $t=0$  sur une couche d'acier inoxydable 316L (SS) à la température  $T_B=300$ K. Les propriétés des matériaux en présence sont considérés dépendantes de la température, nous donnons à titre d'exemple les conductivités du Ni et celle du Cu [6]. Le Nickel a une variation linéaire (eq. 12), celle de Cu est représentée sur la figure 2 .

$$K_{cu}(T) = 120,918 + 0,054 T - 1,380 \times 10^{-5} T^2 + 6,759 \times 10^{-10} T^3 \quad (11)$$

$$K_{Ni}(T) = 13,256 + 0,023 T \quad (12)$$

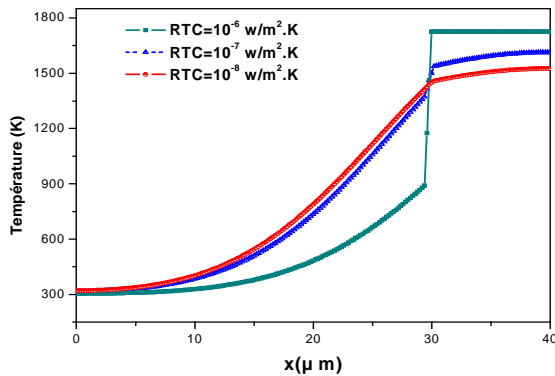
$$Cp(T) = 489.83658 + 0.00882 \times T + 5.09976E - 5 \times T^2 \quad (13)$$

Le modèle utilisé est validé dans un précédent travail avec des résultats numériques et expérimentaux de la littérature avec et sans changement de phase [7,8].

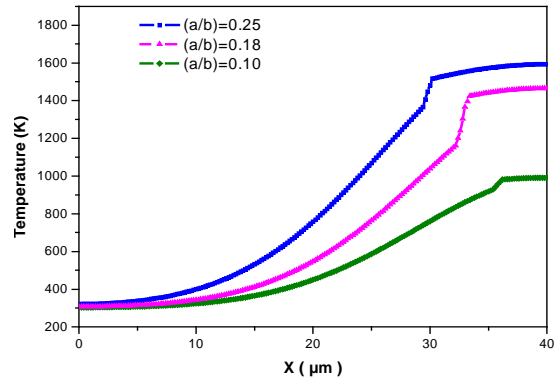
Pour les matériaux considérés dans la présente étude, on s'intéresse d'abord à l'influence de la résistance thermique de contact (RTC) sur le profil de température dans les deux matériaux. D'après la Figure 3, une valeur de RTC de l'ordre de  $10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  le contact est presque parfait et que plus la valeur de la RTC augmente plus le saut de température est important ce qui réduit le transfert de chaleur vers l'acier inoxydable. Ainsi il est possible de quantifier le transfert dans le bicouche en fonction de la qualité du contact du matériau d'apport avec le substrat.

Pour une résistance thermique de l'ordre de  $10^{-7} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , on étudie l'effet du rapport de l'épaisseur de la lamelle Ni ( $5 \mu\text{m}$ ;  $7,5 \mu\text{m}$  et  $10 \mu\text{m}$ ). La Figure 4 illustre les profils de températures des deux matériaux à l'instant  $t=4,27 \mu\text{s}$ . On remarque que la température diminue avec l'épaisseur de la couche Ni déposée. Par ailleurs, le saut de température à l'interface diminue avec l'épaisseur de la couche de Ni jusqu'à une certaine valeur où le saut

devient négligeable. Ceci peut être exploité pour la réalisation d'un revêtement de bonne qualité à travers l'estimation de la taille des couches déposées.

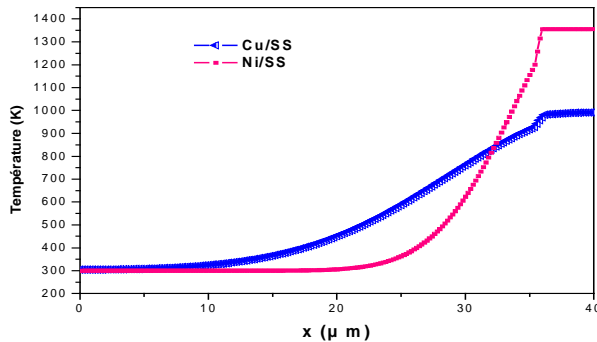


**Figure 3 :** Profil de température dans le cas Ni/SS pour différentes valeurs de RTC à  $t=4,27\mu s$

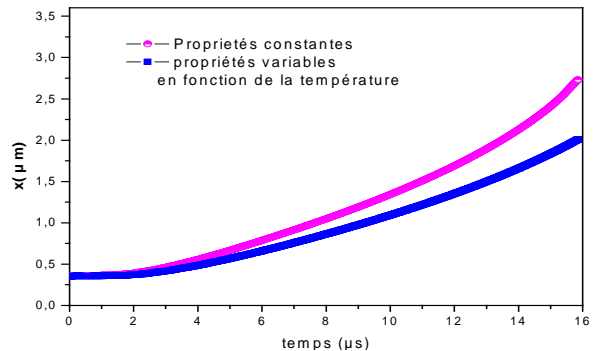


**Figure 4 :** Profil de température dans le cas Ni/SS pour différentes valeurs du rapport des deux matériaux  $(a/b)$  à  $t=4,27\mu s$

Afin de déterminer l'effet de la conductivité du matériau A, on a remplacé la lamelle de Ni par une lamelle en Cu (même température épaisseur). D'après la Figure 5, on remarque que pour la même valeur de RTC, la température augmente dans le substrat qui a la conductivité la plus faible, alors qu'elle diminue dans le cuivre ; Ceci s'explique par le fait que les domaines à conductivité thermique élevée sont moins sensibles au type des conditions thermiques à l'interface.



**Figure 5 :** Effet de la nature du matériau A sur le profil de température pour deux types de matériaux Ni et Cu à  $t=4,27\mu s$ ;



**Figure 6 :** Effet de la variation des propriétés physiques des matériaux en fonction de température sur l'avancement du front de solidification dans le matériau A

Pour examiner l'effet de la prise en compte de propriétés dépendantes de la température par rapport à celles elles sont considérées constantes, d'après l'équation (13), la chaleur spécifique  $C_p(T)$  augmente avec la température, en effet la quantité d'énergie emmagasinée par le matériau A pour changer de phase est plus importante, ainsi il lui faut plus de temps pour se refroidir en dégageant cette quantité par conduction vers le substrat et pour changer de phase, d'où l'avancement retardé du front de solidification, ce qui explique le décalage entre les deux fronts de la figure 5.

## 4. CONCLUSION

La simulation du phénomène de solidification rapide, au sein des matériaux multicouches en contact imparfait, et la détermination des champs thermiques à l'interface, sont des éléments primordiaux dans le domaine de la projection thermique.

A ces échelles spatio-temporelles, la modélisation numérique montre sa fiabilité devant les différentes difficultés liées à l'accès aux mesures expérimentales et surtout au sein des matériaux composites.

Le présent travail étend l'exploitation d'un outil développé et validé pour les transferts en présence de changement de phase au cas des composites à propriétés variables. Cette première approche de faisabilité devra donner lieu à une étude approfondi de l'impact des propriétés variables sur le cinétique du changement de phase et l'optimisation des conditions opératoire de la réalisation des dépôts par plasmas thermiques.

**Remerciements :** au programme Utique 04G1312 du Comité Mixte Franco-Tunisien et à l'Ecole Doctorale ED STS de l'Université de Limoges.

### Nomenclature

#### Symboles

$a$	épaisseur du matériau A, $m$
$b$	épaisseur du matériau B, $m$
$C_p$	capacité thermique massique, $J/kg.K$
$L$	épaisseur du bicouche (a+b), $m$
$K$	conductivité thermique, $W/m.K$
$L$	chaleur latente de solidification, $J/Kg$
$Ste$	nombre de Stefan
$T$	température, $K$
$T_m$	température de solidification du splat, $K$
$RTC$	résistance thermique de contact, $W/m^2.K$
$V_i$	vitesse à l'interface solide/liquide, $m/s$

$\rho$	masse volumique, $kg/m^3$
$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2/s$

#### Indices

$h$	phase solide ( $h=S$ ) et phase liquide ( $h=L$ )
$S, L$	phase solide, liquide
$m$	splat ( $m=1$ ) et substrat ( $m=2$ )
$i$	interface solide-liquide
$ms$	solidus
$ml$	liquidus

#### Symboles Grec

### Références

- [1] P. Fauchais, *Understanding plasma spraying*, 2004, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, pp. R86-R108.
- [2] P. Fauchais, M. Fukumoto, A. Vardelle and M. Vardelle, 2004, J. of Thermal Spray Technology, 13,(3), pp. 337-360.
- [3] L. Bianchi, A. C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle and P. Fauchais, *Microstructural investigation of plasma sprayed ceramic splats*, Thin solid films 305 (1997) 35-47.
- [4] M. El Ganaoui, A Lamazoude, P. Bontoux And D. Morvan Computers & Fluids, 31, Issue (4-7), PP. 539-556, 2002.
- [5] S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, USA, 1980.
- [6] B. Pateyron, G. Delluc, N. Calvé T&TWinner, la chimie et les propriétés de transports en ligne, dans l'intervalle de 300 K à 20000 K. Technologie en Mécanique, C.T. 1, 005-010 (2005) Mécanique et Industrie 4 (2005).
- [7] S. Ben Naoua, H. Sammouda, M. El Ganaoui, P. Fauchais « Numerical analysis of plasma surface interaction », *Proceeding du XV International Conference on Gas Discharges and their Applications GD2004, Toulouse-France, September 5-10 2004.* pp. 997-1001.
- [8] S. Ben Naoua, M. El Ganaoui, H. Sammouda and P. Fauchais, "Rapid solidification study of stabilized zirconia under plasma spraying" *Journal of High Temperature Material Processes, An International Quarterly of High Technology Plasma Processes.* Volume 10 issue 2 pp. 185-196 (2006).